

Research on Cubic Fitting Correction Based on Distortion Analysis of Optical System in High Speed Range Photography

Dongji Zhu¹, Jianfeng Liu^{1*}, Rong Gao², Yu Zhao¹, Yuchao Wang^{1*}

¹Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan

²China Airlines Xi'an Aeroengine Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: *ljf197802@126.com, *wangyuchao321@yeah.net

Received: Jun. 7th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

Aiming at the characteristic of short focal length and large view field of high-speed TV measurement system in shooting range, the influence of optical system distortion on measurement accuracy is analyzed. Considering that the optical distortion is difficult to overcome, the mathematical model of cubic equation fitting is established by experiment and image correction, using field of view calibration data and least square principle, and the distortion correction of optical full field of view is carried out. The results show that this method can effectively improve the optical measurement accuracy of short focal length and large field of view in shooting range, which is simple, practical and operable.

Keywords

High-Speed Photography, Optical Distortion, Cubic Fitting, Correction

基于靶场高速摄影光学系统畸变分析的三次拟合校正研究

朱东济¹, 刘剑锋^{1*}, 高蓉², 赵宇¹, 王玉超^{1*}

¹西昌卫星发射中心, 四川 西昌

²中国航发西安航空发动机有限公司, 陕西 西安

Email: *ljf197802@126.com, *wangyuchao321@yeah.net

收稿日期: 2019年6月7日; 录用日期: 2019年6月21日; 发布日期: 2019年6月28日

*通讯作者。

文章引用: 朱东济, 刘剑锋, 高蓉, 赵宇, 王玉超. 基于靶场高速摄影光学系统畸变分析的三次拟合校正研究[J]. 光电子, 2019, 9(2): 99-105. DOI: 10.12677/oe.2019.92015

摘要

针对靶场高速电视测量系统短焦距大视场的特点,分析了畸变对测量精度的影响;考虑到靶场短焦距光学系统畸变难以克服的问题,采用实验法和图像矫正法,利用视场标校数据、基于最小二乘原理,建立了三次方程拟合的数学模型,对光学系统全视场进行了畸变校正。实验结果表明,该方法能够有效提高短焦距大视场光学系统靶场测量的精度,简便实用,可操作性强。

关键词

靶场高速摄影,畸变,三次拟合,校正

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据航天工程任务的需要,用于跟踪测量箭体垂直起飞段的高速电视测量仪(经纬仪)设备必须具有尽可能大的像方视场,以保证目标完整和清晰成像,一般采用大视场、短焦距的跟踪方式设计理念[1] [2]。而这种设计不可避免的存在光学畸变[3]:采用高斯成像公式而存在的非线性误差;由于工艺水平限制,光学系统在加工时可能会带来形变;探测器本身排列就不规则等等。所有这些都造成图像畸变,其经典表现为图像中的物体扭曲、远近比例不协调等失真问题。这些畸变,必将影响光学系统的测角精度[4],进而影响火箭垂直段飞行状态的评估。所以,必须形成有效的修正方法消除畸变。

国内一些科研院所,很早已经对光学镜头畸变校正展开了大量的研究。针对各种光学镜头畸变,已经有相应的畸变校正数学模型[5],在图像畸变处理上也方法各异。文献[6]采用了分区处理的思想,将成像靶面分为多个区,对每一个区域进行线性最小二乘法处理得到所需要的参数,文献[7]提出了一种分区修正靶面畸变的算法,文献[8]根据畸变与焦距、成像高度之间对应的变化规律提出了一种改进的半球形畸变校正模型,文献[9]采用了最小二乘法和分型插值曲面法。这些方法不外乎实验法和基于图像的数字校正方法两种。本文同时采用实验法和图像校正法,根据畸变检测装置的标定,测出不同畸变处的真实视场,利用成像关系修正图像的像素坐标误差,进行三次方程拟合建立整个视场的校正数学模型,使用方便,校正精度高。

2. 畸变对测量精度的影响

由于火箭在垂直起飞段的漂移量处理精度要求较高,对跟踪误差的修正一般采用如下模型。

$$A' = A + \arctan \left(\frac{x}{f \cdot \cos E - y \cdot \sin E} \right) \quad (1)$$

$$E' = \arcsin \left(\frac{f \cdot \sin E + y \cdot \cos E}{\sqrt{f^2 + x^2 + y^2}} \right) \quad (2)$$

$$f = \frac{180 \times 3600 \times l}{\pi \times K} \quad (3)$$

式中： A' 、 E' 为跟踪误差修正后的方位角、俯仰角， A 、 E 为经纬仪转台方位角、俯仰角， x 、 y 为目标相对于图像原点的脱靶量， f 为摄影焦距， K 为角分辨率， l 为对应角分辨率像元尺寸。

可以看出，在测角精度一定、目标脱靶量提取精度一定的条件下，目标测角值仅受像元角分辨率的影响。

针对一实际的短焦光学系统， f 在 25 mm、35 mm、50 mm 处固定使用。后端相机的分辨率为 1280×1024 ，将 x 和 y 坐标为(640, 512)处设为坐标原点。在焦距 $f = 50$ mm 时测定其不同区域的像元角分辨率。以坐标原点为中心，范围为 50×50 的正方形区域内，其单个像素的平均角分辨率为 $41''$ ，而在视场最边缘的左上、右上、左下、右下，同样对范围为 50×50 的区域，其平均角分辨率分别为 $38.0''$ ， $38.3''$ ， $37.8''$ ， $38.1''$ ，可见视场的中心区域平均角分辨率比视场边缘大将近 2"，考虑到此设备老化，像素不高、光学系统分辨率一般，目标在视场最边缘时，若不进行角分辨率校正，其角度测量误差最大可达 $1280 \times (38.3 - 37.8) = 640''$ ，即 $10.7'$ 。由此可见，畸变带来的角分辨率误差对最终的测量精度影响非常大，对于短焦光学系统，其带来的误差甚至占有系统误差的绝大部分。

3. 数据处理及校正方法

3.1. 数据基础处理

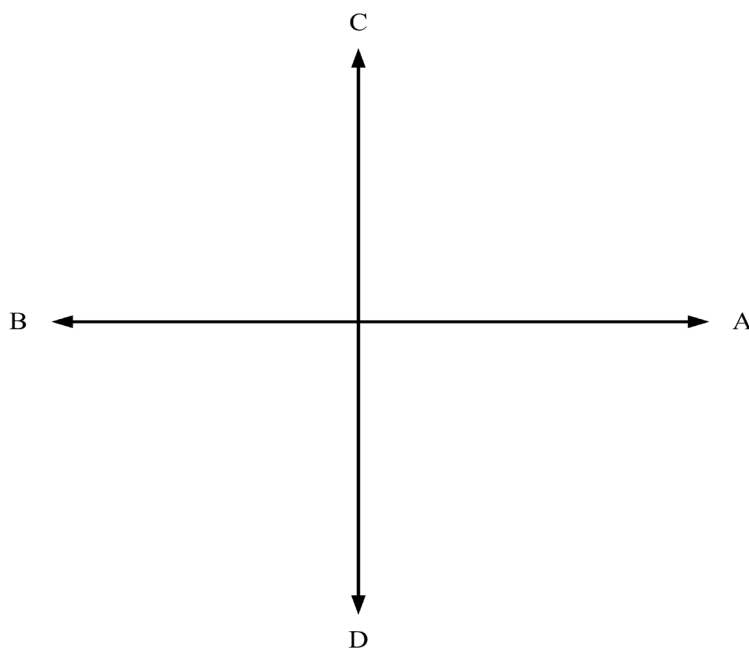


Figure 1. Field-of-view coordinates schematic diagram

图 1. 视场坐标示意图

以某台的畸变数据为例进行分析。检测中心给出真值坐标表，简图如上图 1 所示：A 和 B 方向表示方位，C 和 D 方向代表俯仰。分别测量 AB 轴和 CD 轴上的位置坐标，得到原始坐标数据。

下面以方位方向为例进行说明，如图 2 所示。

图 2 表格中(959.5, 538)是中心点位置，A 列和 B 列是方位原始数据从大到小的排序，C 列是各个坐标与方位中心点坐标值(959.5)的差值。D 列是检测中心测定的对应坐标点的角度真值(单位为度 $^{\circ}$)。E 列对 D 列求逆(当坐标值为正时，不要求逆)。F 列利用成像几何公式 $\tan(x * \pi / 180) * 25.78 / 0.01$ 求出真值对应的坐标位置，其中 25.78 mm 为摄像系统焦距，0.01 mm 为探测器像元尺寸。

	A	B	C	D	E	F
中心点	A					
	959.5	x				
A10	510.5	-449	10.02081	-10.0208	-455.536	
A9	555	-404.5	9.020444	-9.02044	-409.258	
A8	600	-359.5	8.019972	-8.01997	-363.231	
A7	645	-314.5	7.015931	-7.01593	-317.266	
A6	690	-269.5	6.014306	-6.01431	-271.61	
AC6	691	-268.5	6.0135	-6.0135	-271.573	
AD6	691	-268.5	6.017556	-6.01756	-271.757	
A5	735	-224.5	5.01175	-5.01175	-226.079	
AC5	735	-224.5	5.012417	-5.01242	-226.109	
AD5	736	-223.5	5.015278	-5.01528	-226.238	
A4	780	-179.5	4.009139	-4.00914	-180.685	
AC4	780	-179.5	4.009681	-4.00968	-180.709	
AD4	780.5	-179	4.011667	-4.01167	-180.799	
A3	825	-134.5	3.007583	-3.00758	-135.449	
AC3	825	-134.5	3.009472	-3.00947	-135.535	
AD3	825	-134.5	3.011708	-3.01171	-135.636	
A2	870	-89.5	2.005653	-2.00565	-90.2804	
AC2	870	-89.5	2.006819	-2.00682	-90.333	
AD2	870	-89.5	2.007042	-2.00704	-90.343	
A1	915	-44.5	1.002111	-1.00211	-45.0942	
AC1	915	-44.5	1.003903	-1.0039	-45.1748	
AD1	915	-44.5	1.004694	-1.00469	-45.2104	

Figure 2. Coordinates and calibration data
图 2. 坐标及标定数据

3.2. 三次拟合方程确定

将镜头的各种轴对称像差、非轴对称像差和摄像机感光面的误差考虑在内，从成像角度出发，通过多阶次及多类拟合模型的平稳性评估，最终建立三次多项式摄像系统畸变修正模型。虽然多项式的阶数越高，方程与实际数据拟合程度越高，但阶数越高，计算过程中舍入误差的积累也越大，当阶数 n 过高时，方程的精度反而会降低，甚至得不到合理的结果。故一般取 $n = 3 \sim 4$ [10]。

$$\begin{cases} x_c = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \\ y_c = b_3y^3 + b_2y^2 + b_1y + b_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $(x, y), (x_c, y_c)$ 分别为目标判读点在畸变修正前和修正后的像面坐标； a_0, a_1, a_2, a_3 及 b_0, b_1, b_2, b_3 为修正系数。

$$Y = \begin{Bmatrix} x_{c1} \\ x_{c2} \\ \vdots \\ x_{cn} \end{Bmatrix}_{n \times 1}, \quad X = \begin{Bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12}^2 & x_{13}^3 \\ 1 & x_{21} & x_{22}^2 & x_{23}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2}^2 & x_{n3}^3 \end{Bmatrix}_{n \times 4}, \quad a = \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix}_{4 \times 1}$$

$$a = \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5)$$

G 列求出真值对应坐标和实际坐标的差值 dx 。以 C 列为 x 坐标，F 列为 y 坐标，利用公式(5)得到计算修正系数，H 列为由公式(4)得到每个点的拟合值。将拟合结果与实际坐标值相加得到拟合坐标值 I 列。

再利用成像几何公式求解拟合坐标值的对应角度，如 J 列所示。K 列为拟合角度值与真值之间的误差值，单位为秒，单位为度的误差值如 L 列所示。数据如图 3 所示。

G	H	I	J	K	L
dx	ddx				
-6.53626	-6.19926	-455.199	-10.0135	-0.00726	-26.1477
-4.75811	-5.04902	-409.549	-9.02675	0.006306	22.70334
-3.73071	-4.05985	-363.56	-8.02714	0.007173	25.82123
-2.76622	-3.22681	-317.727	-7.02601	0.010084	36.30142
-2.10952	-2.53102	-272.031	-6.02357	0.009265	33.35348
-3.07287	-2.51697	-271.017	-6.00128	-0.01222	-43.99
-3.25738	-2.51697	-271.017	-6.00128	-0.01627	-58.59
-1.57852	-1.95358	-226.454	-5.02002	0.008272	29.77916
-1.60874	-1.95358	-226.454	-5.02002	0.007605	27.37916
-2.73847	-1.94195	-225.442	-4.99771	-0.01757	-63.2442
-1.18454	-1.47559	-180.976	-4.01558	0.006437	23.17312
-1.20903	-1.47559	-180.976	-4.01558	0.005895	21.22312
-1.79883	-1.47077	-180.471	-4.00441	-0.00726	-26.1201
-0.9494	-1.07816	-135.578	-3.01044	0.002854	10.27365
-1.03463	-1.07816	-135.578	-3.01044	0.000965	3.473648
-1.13552	-1.07816	-135.578	-3.01044	-0.00127	-4.57635
-0.7804	-0.7424	-90.2424	-2.00481	-0.00084	-3.03647
-0.83296	-0.7424	-90.2424	-2.00481	-0.00201	-7.23647
-0.84297	-0.7424	-90.2424	-2.00481	-0.00223	-8.03647
-0.59417	-0.44941	-44.9494	-0.99889	-0.00322	-11.579
-0.67481	-0.44941	-44.9494	-0.99889	-0.00501	-18.029
-0.71045	-0.44941	-44.9494	-0.99889	-0.0058	-20.879

Figure 3. Processed data

图 3. 处理后的数据

俯仰方向的计算方法同方位。

4. 应用效果分析

以某次试验数据为例，对图像成像中的测量点的判读结果进行畸变修正处理。图 4(a)、图 4(b)分别为像平面上两个坐标方向的数据拟合效果图。

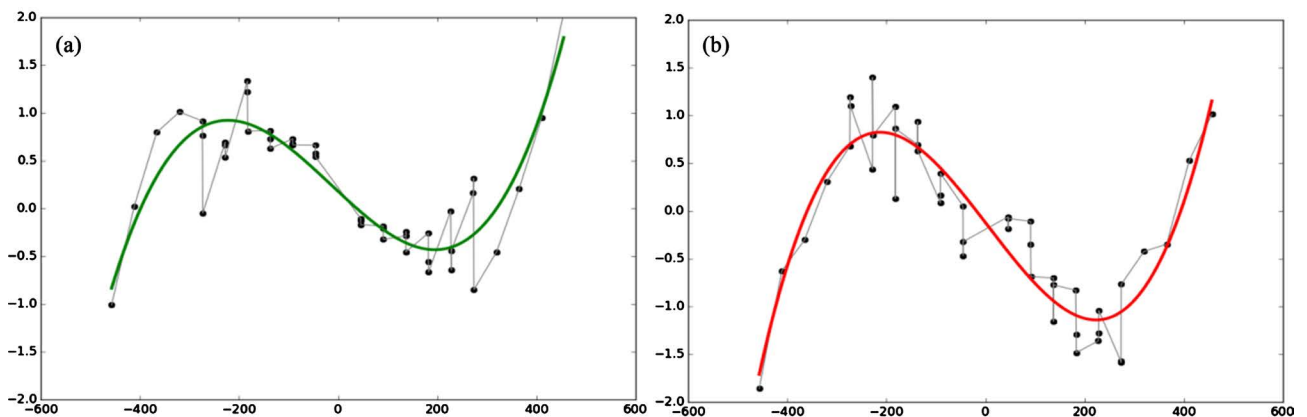


Figure 4. (a) X-direction fitting effect map; (b) Y-direction fitting effect map

图 4. (a) X 方向拟合效果图; (b) Y 方向拟合效果图

通过建立 x 方向拟 $x_c = 0.0000000475x^3 - 0.0000007507x^2 - 0.0067576714x - 0.1227351960$ ， y 方向拟

合 $y_c = 0.0000000371y^3 + 0.0000015221y^2 - 0.0048417881y + 0.1792150459$ ，避免了数据大幅度摆动，使得数据更加平稳。

图 5(a)~(d)为判读数据畸变修正前后反映到测角数据的对比图。其中图 5(a)和图 5(b)分别为修正前的角度数据，图 5(c)和图 5(d)分别为修正后的角度数据。

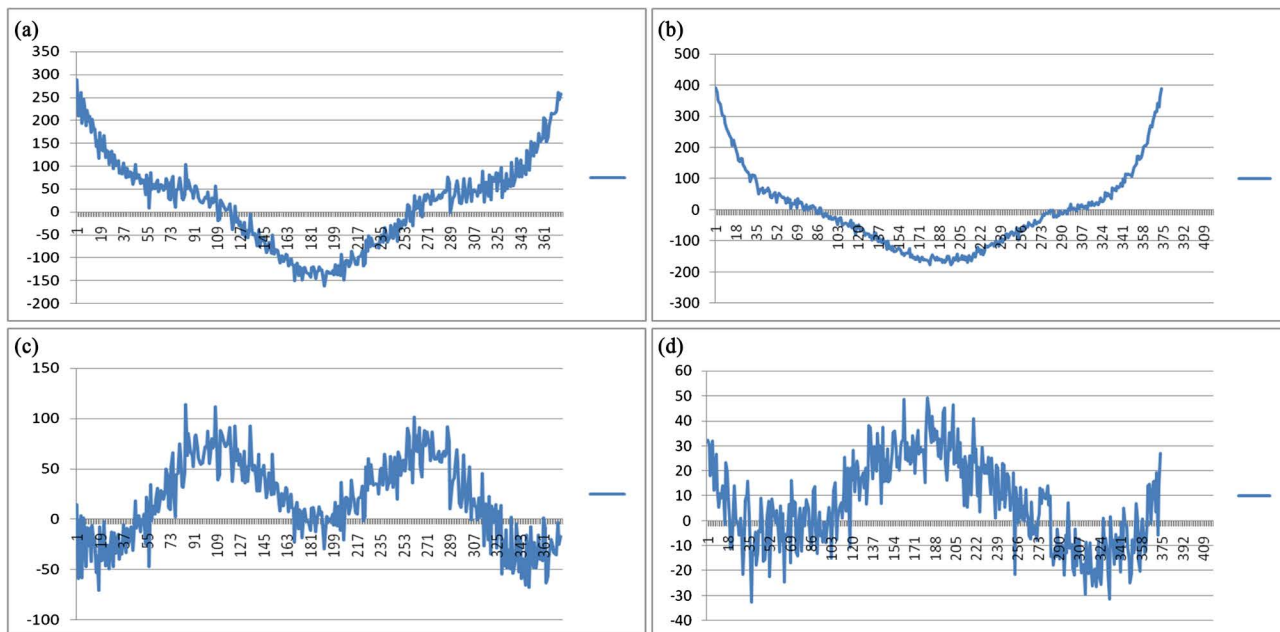


Figure 5. (a) Before distortion correction azimuth error data diagram; (b) Before distortion correction angle of pitch error data diagram; (c) After distortion correction azimuth error data diagram; (d) After distortion correction angle of pitch error data diagram

图 5. (a) 畸变修正前方位角误差数据图; (b) 畸变修正前俯仰角误差数据图; (c) 畸变修正后方位角误差数据图; (d) 畸变修正后方位角误差数据图

从图 5 中可以直观地看出。其中图 5(a)的精度为 49.63479 秒，其中图 5(b)的精度为 125.8795 秒，其中图 5(c)的精度为 26.36305 秒，其中图 5(d)的精度为 18.65386 秒，定性地验证了畸变修正的有效性。

5. 结束语

本文针对目前靶场短焦距大视场光学系统畸变带来测量误差的问题，通过实验数据对光学系统的整个视场进行标定，利用最小二乘原理建立了视场畸变校正的三次方程拟合，对成像的图像像素进行方位和俯仰方向的补偿校正，有效地改善了靶场光学系统测量的精度。该方法原理清晰、过程简洁、简便实用，但在视场标定上，本文还只选取了水平和垂直方向上的测量数据，不同的选取方法可能会对畸变校正有较大的影响，还有待进一步研究。

基金项目

“973”国家重点基础科学研究计划(2011CB302000); 国家自然科学基金重点项目(51232009, 51202299, 61473222, 91646108); 全军重点军事科研计划项目资助。

参考文献

- [1] 崔书华, 胡绍林, 柴敏. 光学跟踪测量数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 王玉超, 刘剑锋, 赵宇, 周袁, 姚大为, 田光龙, 盛华雄, 马忠权. 高速电视测量光学系统设计及其在航天靶场

- 中的应用[J]. 发光学报, 2018, 39(8): 1177-1181.
- [3] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [5] 翟优, 曾峦, 熊伟. 图像像素坐标表示的镜头畸变模型[J]. 光学技术, 2015, 41(3): 265-269.
- [6] 王喜军, 曹旭耀, 王东鹤, 张磊. 用分区处理方法对短焦红外经纬仪像点位置的修正[J]. 光电工程, 2013, 40(10): 48-53.
- [7] 王方雨, 何昕, 魏仲慧. 光电经纬仪红外图像自动化分区畸变校正[J]. 红外技术, 2014, 36(10): 796-800.
- [8] 杨秋慧, 玉昊昕, 李陶深, 玉振明. 一种大视场镜头的畸变校正方法[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(9): 136-140.
- [9] 于国栋. 靶场光学镜头畸变校正方法研究[J]. 液晶与显示, 2017, 32(3): 227-233.
- [10] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5450, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oe@hanspub.org